

Einführung in die Teilchenphysik

Das Standardmodell

Daniel Meister

03/22/2013

Masterclass 2013

Vormittag	Hörsaal Y16-G15
9:00 – 9:05	Begrüssung (Christoph Grab, Ulrich Straumann)
9:05 – 9:50	Einführung in die Teilchenphysik (Daniel Meister)
9:50 – 10:35	Detektoren und Beschleuniger (Marc Dunser)
10:35 – 11:00	Kaffeepause im Foyer
11:00 – 12:30	Führung durch das Physik-Institut
12:30 – 13:45	Mittagspause

Nachmittag	Hörsaal Y16-G15
13:45 – 14:15	Einführung “Scannen” (Christoph Nägeli)

Nachmittag	Computerräume Y01-F08 und Y01-F50
14:15 – 16:00	Eventanalyse

Nachmittag	Hörsaal Y16-G15
16:00 – 16:30	Kaffeepause im Foyer
16:30 – 17:30	Diskussion der Ergebnisse (Daniel Meister, Ulrich Straumann)

1 Was ist Teilchenphysik

Was sind elementare Bausteine der Materie?

Welche Kräfte wirken zwischen diesen Bausteinen?

2 Das Standardmodell (SM)

3 Das Higgs-Boson

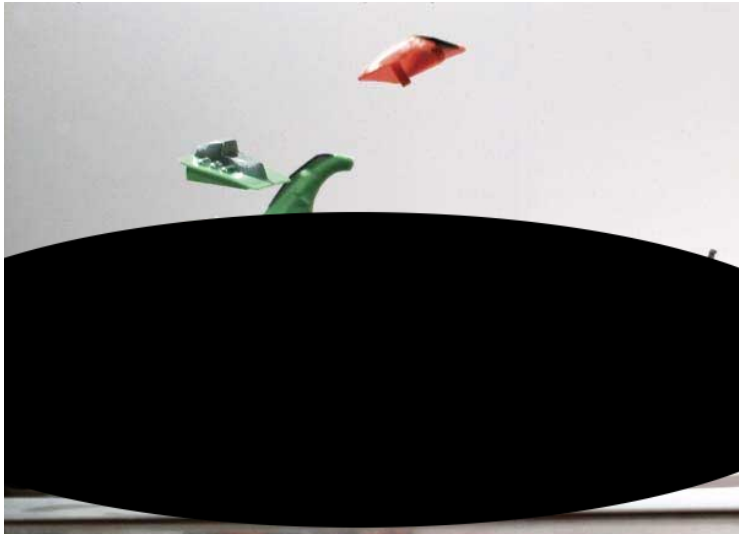
4 Wichtig für heute: W und Z

5 Fragen

Was ist Teilchenphysik?

- Grundlagenforschung
 - oft keine direkte Anwendungsmöglichkeiten im täglichen Leben
 - aber oft Grundlage für spätere Entwicklungen oder nützliche Entdeckungen
- Überprüfung von theoretischen Modellen
 - es gibt verschiedenste Vorhersagen aus der Theorie der Teilchenphysik
 - mit Experimenten können wir Theorien überprüfen und ausschliessen
- *Dass ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält
[. . .]*

- “Aufeinanderschliessen” von verschiedenen Teilchen
 - bei möglichst grossen Energien
- “Anschauen” der “Überreste” der Kollision
- Modellvorstellung: Kollision von 2 Autos
 - Was hatten die beiden Autos für eine Farbe?
 - Welches Auto ist vor der Kollision stillgestanden?





- “Aufeinanderschossen” von verschiedenen Teilchen
 - bei möglichst grossen Energien
- “Anschauen” der “Überreste” der Kollision
- Modellvorstellung: Kollision von 2 Autos
 - Was hatten die beiden Autos für eine Farbe?
 - Welches Auto ist vor der Kollision stillgestanden?
- Mehr dazu im nächsten Vortrag
 - über Detektoren und Beschleuniger

Louis de Broglie (1924):

$$E \sim \frac{1}{\lambda}$$

- Grössere Energie \rightarrow kleinere Wellenlänge
- Die Wellenlänge entspricht dem Auflösungsvermögen
 \rightarrow d.h. je kleiner die Wellenlängen desto kleinere Dinge sind "sichtbar"
- Grosse Energien \rightarrow Grosses Auflösungsvermögen

Albert Einstein (1905):

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

mit Energie E , Masse m , Impuls p und Lichtgeschwindigkeit c

- Bekannter ist der Spezialfall für ruhende Teilchen
→ ruhendes Teilchen ($p = 0$): $E = mc^2$
- Masse ist eine Form von Energie
→ d.h. Masse ist nicht erhalten sondern kann erzeugt und vernichtet werden
- Mehr Energie → schwerere Teilchen erzeugbar

Was sind elementare Bausteine der Materie?

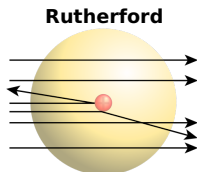
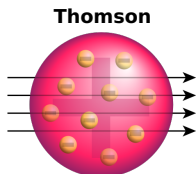


Periodensystem der Elemente

Periode	Nebengruppen																Hauptgruppen										Schale	
1	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Ordnungszahl</p> <p>Elementsymbol</p> <p>Elementname</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>20</p> <p>Ca</p> <p>Calcium</p> </div> <div> <p>Relative Atommasse (g/mol)</p> <p>Elektronenaffinität</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Fe</p> <p>O</p> <p>Hg</p> <p>Tc</p> </div> <div> <p>Feste Elemente</p> <p>Gasförmige Elemente</p> <p>Flüssige Elemente (20°C)</p> <p>Radioaktive Elemente/</p> <p>Atommasse des stabilsten Isotops</p> </div> </div>										2	K
2	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>3</p> <p>Li</p> <p>Lithium</p> </div> <div> <p>4</p> <p>Be</p> <p>Beryllium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>5</p> <p>B</p> <p>Bor</p> </div> <div> <p>6</p> <p>C</p> <p>Kohlenstoff</p> </div> <div> <p>7</p> <p>N</p> <p>Stickstoff</p> </div> <div> <p>8</p> <p>O</p> <p>Sauerstoff</p> </div> <div> <p>9</p> <p>F</p> <p>Fluor</p> </div> <div> <p>10</p> <p>Ne</p> <p>Neon</p> </div> </div>										L	
3	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>11</p> <p>Na</p> <p>Natrium</p> </div> <div> <p>12</p> <p>Mg</p> <p>Magnesium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>13</p> <p>Al</p> <p>Aluminium</p> </div> <div> <p>14</p> <p>Si</p> <p>Silicium</p> </div> <div> <p>15</p> <p>P</p> <p>Phosphor</p> </div> <div> <p>16</p> <p>S</p> <p>Schwefel</p> </div> <div> <p>17</p> <p>Cl</p> <p>Chlor</p> </div> <div> <p>18</p> <p>Ar</p> <p>Argon</p> </div> </div>										M	
4	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>19</p> <p>K</p> <p>Kalium</p> </div> <div> <p>20</p> <p>Ca</p> <p>Calcium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>21</p> <p>Sc</p> <p>Scandium</p> </div> <div> <p>22</p> <p>Ti</p> <p>Titan</p> </div> <div> <p>23</p> <p>V</p> <p>Vanadium</p> </div> <div> <p>24</p> <p>Cr</p> <p>Chrom</p> </div> <div> <p>25</p> <p>Mn</p> <p>Mangan</p> </div> <div> <p>26</p> <p>Fe</p> <p>Eisen</p> </div> <div> <p>27</p> <p>Co</p> <p>Kobalt</p> </div> <div> <p>28</p> <p>Ni</p> <p>Nickel</p> </div> <div> <p>29</p> <p>Cu</p> <p>Kupfer</p> </div> <div> <p>30</p> <p>Zn</p> <p>Zink</p> </div> </div>										N	
5	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>37</p> <p>Rb</p> <p>Rubidium</p> </div> <div> <p>38</p> <p>Sr</p> <p>Strontium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>39</p> <p>Y</p> <p>Yttrium</p> </div> <div> <p>40</p> <p>Zr</p> <p>Zirkon</p> </div> <div> <p>41</p> <p>Nb</p> <p>Niob</p> </div> <div> <p>42</p> <p>Mo</p> <p>Molybdän</p> </div> <div> <p>43</p> <p>Tc</p> <p>Technetium</p> </div> <div> <p>44</p> <p>Ru</p> <p>Ruthenium</p> </div> <div> <p>45</p> <p>Rh</p> <p>Rhodium</p> </div> <div> <p>46</p> <p>Pd</p> <p>Palladium</p> </div> <div> <p>47</p> <p>Ag</p> <p>Silber</p> </div> <div> <p>48</p> <p>Cd</p> <p>Cadmium</p> </div> </div>										O	
6	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>55</p> <p>Cs</p> <p>Cäsium</p> </div> <div> <p>56</p> <p>Ba</p> <p>Barium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>57-71</p> <p>Lanthanoide</p> </div> <div> <p>72</p> <p>Hf</p> <p>Hafnium</p> </div> <div> <p>73</p> <p>Ta</p> <p>Tantal</p> </div> <div> <p>74</p> <p>W</p> <p>Wolfram</p> </div> <div> <p>75</p> <p>Re</p> <p>Rhenium</p> </div> <div> <p>76</p> <p>Os</p> <p>Osmium</p> </div> <div> <p>77</p> <p>Ir</p> <p>Iridium</p> </div> <div> <p>78</p> <p>Pt</p> <p>Platin</p> </div> <div> <p>79</p> <p>Au</p> <p>Gold</p> </div> <div> <p>80</p> <p>Hg</p> <p>Quecksilber</p> </div> </div>										P	
7	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>87</p> <p>Fr</p> <p>Francium</p> </div> <div> <p>88</p> <p>Ra</p> <p>Radium</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>89-103</p> <p>Actinoide</p> </div> <div> <p>104</p> <p>Rf</p> <p>Rutherfordium</p> </div> <div> <p>105</p> <p>Db</p> <p>Dubnium</p> </div> <div> <p>106</p> <p>Sg</p> <p>Seaborgium</p> </div> <div> <p>107</p> <p>Bh</p> <p>Berkelium</p> </div> <div> <p>108</p> <p>Hs</p> <p>Hassium</p> </div> <div> <p>109</p> <p>Mt</p> <p>Moscovium</p> </div> <div> <p>110</p> <p>Ds</p> <p>Darmstadtium</p> </div> <div> <p>111</p> <p>Rg</p> <p>Röntgenium</p> </div> <div> <p>112</p> <p>Cn</p> <p>Copernicium</p> </div> </div>										Q	
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>Metalle</p> </div> <div> <p>Nichtmetalle</p> </div> <div> <p>Übergangsmetalle</p> </div> <div> <p>Elemente der f-Reihe</p> </div> </div>																<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>57</p> <p>La</p> <p>Lanthan</p> </div> <div> <p>58</p> <p>Ce</p> <p>Cer</p> </div> <div> <p>59</p> <p>Pr</p> <p>Praseodym</p> </div> <div> <p>60</p> <p>Nd</p> <p>Neodym</p> </div> <div> <p>61</p> <p>Pm</p> <p>Promethium</p> </div> <div> <p>62</p> <p>Sm</p> <p>Samarium</p> </div> <div> <p>63</p> <p>Eu</p> <p>Europium</p> </div> <div> <p>64</p> <p>Gd</p> <p>Gadolinium</p> </div> <div> <p>65</p> <p>Tb</p> <p>Terbium</p> </div> <div> <p>66</p> <p>Dy</p> <p>Dysprosium</p> </div> <div> <p>67</p> <p>Ho</p> <p>Holmium</p> </div> <div> <p>68</p> <p>Er</p> <p>Erbium</p> </div> <div> <p>69</p> <p>Tm</p> <p>Thulium</p> </div> <div> <p>70</p> <p>Yb</p> <p>Ytterbium</p> </div> <div> <p>71</p> <p>Lu</p> <p>Lutetium</p> </div> </div>											
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>89</p> <p>Ac</p> <p>Actinium</p> </div> <div> <p>90</p> <p>Th</p> <p>Thorium</p> </div> <div> <p>91</p> <p>Pa</p> <p>Protactinium</p> </div> <div> <p>92</p> <p>U</p> <p>Uran</p> </div> <div> <p>93</p> <p>Np</p> <p>Neptunium</p> </div> <div> <p>94</p> <p>Pu</p> <p>Plutonium</p> </div> <div> <p>95</p> <p>Am</p> <p>Americium</p> </div> <div> <p>96</p> <p>Cm</p> <p>Curium</p> </div> <div> <p>97</p> <p>Bk</p> <p>Berkelium</p> </div> <div> <p>98</p> <p>Cf</p> <p>Californium</p> </div> <div> <p>99</p> <p>Es</p> <p>Einsteinium</p> </div> <div> <p>100</p> <p>Fm</p> <p>Fermium</p> </div> <div> <p>101</p> <p>Md</p> <p>Mendelevium</p> </div> <div> <p>102</p> <p>No</p> <p>Nobelium</p> </div> <div> <p>103</p> <p>Lr</p> <p>Lawrencium</p> </div> </div>																											

Quelle: basf.ch

- Atom (von griechisch $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ – das Unteilbare)
→ aber Periodensystem hat eine gut sichtbare Struktur
- Thomsonsches Atommodell (Rosinenkuchenmodell)
→ Thomson hat im Jahr 1897 das Elektron in Kathodenstrahlen “entdeckt”
→ Atom ist positiv geladene Masse, in der sich negativ geladene Elektronen bewegen
- Rutherford'sches Atommodell (fast alle Masse im Kern)
→ Rutherford'scher Streuversuch im Jahr 1909



Quelle: wikipedia.org

- Keine Substruktur für das Elektron bekannt
→ auch bei den höchsten Energien wird das Elektron immer noch als Punktteilchen gesehen
- Der Atomkern besteht aus
 - Protonen und Neutronen
 - welche wiederum aus up- und down-Quarks bestehen
→ noch keine Substruktur der Quarks gefunden



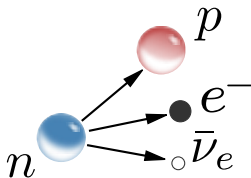
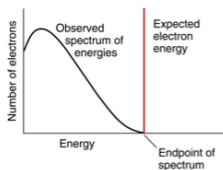
Quelle: wikipedia.org

“Teilchen”	Größenordnung
Materie	$\sim 10^{-2}$ m
Molekül	$\sim 10^{-9}$ m
Atom	$\sim 10^{-10}$ m
Atomkern	$\sim 10^{-14}$ m
Proton	$\sim 10^{-15}$ m
Quark	$< 10^{-18}$ m

- Beobachtung des β -Zerfalls zeigt, dass etwas fehlt

→ β -Zerfall heisst z.B. ein freies Neutron zerfällt in ein Proton und ein Elektron

→ wir nehmen an, dass das Proton in Ruhe ist und schauen die Energie der Elektronen an



- Wolfgang Pauli postuliert im Jahr 1930 das *Neutrino*

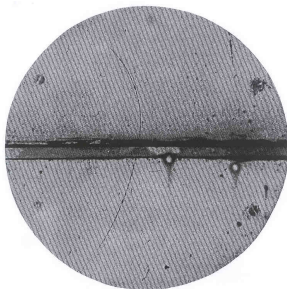
→ erst im Jahr 1956 experimentell nachgewiesen

- Im Jahr 1936 wird ein “Kopie” des Elektrons entdeckt
→ gleiche Eigenschaften wie das Elektron aber 200x schwerer
- In den nächsten Jahrzehnten diverse weitere Teilchen
→ z.B. ein weiteres Lepton (τ) sowie eine zweite und dritte Quark-Generation

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

	I	II	III
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Name	u up	c charm	t top
Quarks	d down	s strange	b bottom
	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	ν_e Elektron- Neutrino	ν_μ Myon- Neutrino	ν_τ Tau- Neutrino
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Leptonen	e Elektron	μ Myon	τ Tau
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$

- Paul Dirac postuliert im Jahr 1926 *Anti-Materie*
 - zu jedem Teilchen soll es ein Anti-Teilchen geben mit gleicher Masse aber umgekehrter Ladung
 - dies verdoppelt die Anzahl der Elementarteilchen (Darstellung meistens nicht doppelt)
- Erster Nachweis eines Anti-Teilchens im Jahr 1932
 - zwar kann er in der kosmischen Strahlung ein Positron (Anti-Elektron) nachweisen



Welche Kräfte wirken zwischen diesen Bausteinen?

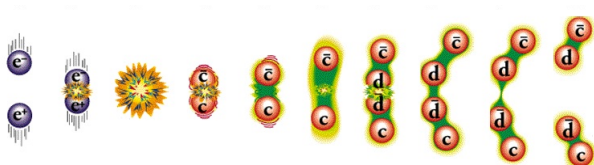
- Elektromagnetische Wechselwirkung
→ sonst würde das Elektron nicht um den Kern kreisen (keine Atome)
- Schwache Wechselwirkung
→ sonst würde die Sonne nicht “funktionieren”
- Starke Wechselwirkung
→ sonst würde der Atomkern nicht zusammenhalten
- Gravitation
→ sonst würde die Erde nicht um die Sonne kreisen

- Neue Vorstellung von Kraft (Wechselwirkungsprinzip)

→ Kräfte werden durch "Botenteilchen" übertragen; diese nennt man Wechselwirkungs-Bosonen

Wechselwirkung	Ladung	Boson	Relative Stärke
Elektromagnetische	elektrisch	Photon (γ)	10^{-2}
Schwache	schwache	W^+, W^-, Z^0	10^{-15}
Starke	Farb-	Gluon (g)	1
Gravitation	Masse(?)	Graviton??	10^{-41}

- Die Eichbosonen der schwachen Kraft sind massiv
→ d.h. Masse $\neq 0$; deshalb ist die Kraft so schwach
- Starke Kraft verhält sich ungewohnt
→ die uns vertrauten Kräfte werden schwächer bei grösserer Entfernung ($F \sim \frac{1}{r^2}$)
→ die starke Kraft wird stärker, je weiter sich die Teilchen voneinander entfernen
→ Quarks kommen deshalb immer nur in gebundenen Zuständen vor



Das Standardmodell (SM)

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III		
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	? GeV
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
Name	u up	c charm	t top	γ Photon	H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	g Gluon	
<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV		
0	0	0	0		
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1		
ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z⁰ Z Boson		
Leptonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
e Elektron	μ Myon	τ Tau	W⁺ W Boson		
				Eichbosonen	

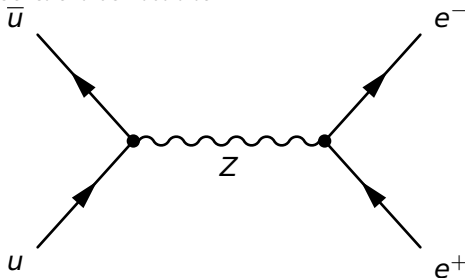
Wir suchen

- 4. Generation
- Erklärung der Struktur

- Materie besteht aus Elektronen, Neutronen und Protonen
→ d.h. genauer aus Elektronen, up und down Quarks
- Andere Teilchen sind “unsichtbar” ...
 - das heisst sie wechselwirken nicht mit dem Detektor
→ z.B. Neutrinos
- ... oder sind nicht stabil
 - kann ein Teilchen zerfallen so geschieht dies
 - schwere Teilchen zerfallen in leichtere Teilchen
→ es gibt verschiedenste Regeln, welche Zerfälle “erlaubt” sind und welche nicht

- Wichtige “mathematische”/ “theoretische” Beschreibung

→ wir brauchen sie heute nur als “Ablaufbilder”



- Wir “lesen” von **links nach rechts**

→ ein Quark und ein Anti-Quark erzeugen ein Z

→ dieses zerfällt dann sofort in ein Elektron und ein Positron

- Das SM hat sogenannte *freie Parameter*
→ d.h. gewisse (Zahlen-)Werte werden vom mathematischen Modell nicht vorhergesagt
- Das SM hat nur masselose Teilchen . . .
→ . . . solange der Higgs-Mechanismus nicht bestätigt ist.
- Das SM hat diverse andere Schwachstellen
→ Details siehe später

Status vor LHC-Start

- Das Higgs-Boson
→ oder andere bisher unbekannte Teilchen
- Supersymmetry
→ d.h. jedes Fermion hat ein neues Boson als Partnerteilchen und umgekehrt
- Dunkle Materie
→ Aus der Astrophysik wissen wir, dass mehr als die sichtbare Materie vorhanden sein muss

Status heute

- Neues SM-ähnliches Higgs-Boson entdeckt
→ mit einer Masse von ungefähr $m = 125 \text{ GeV}$

- Gibt es eine einheitliche Theorie für alle Kräfte?
 - wir haben eine extrem gut getestete Theorie, die elektromagnetische und schwache WW beschreibt
 - zuerst Integration der starken Wechselwirkung (Grand Unification)
 - dann evtl. auch Beschreibung der Gravitation durch Teilchenwechselwirkung (Quantum Gravity)
- Gibt es zusätzliche Dimensionen?
- Warum gibt es mehr Materie als Anti-Materie?
- ...? (Überraschungen)

Das Higgs-Boson

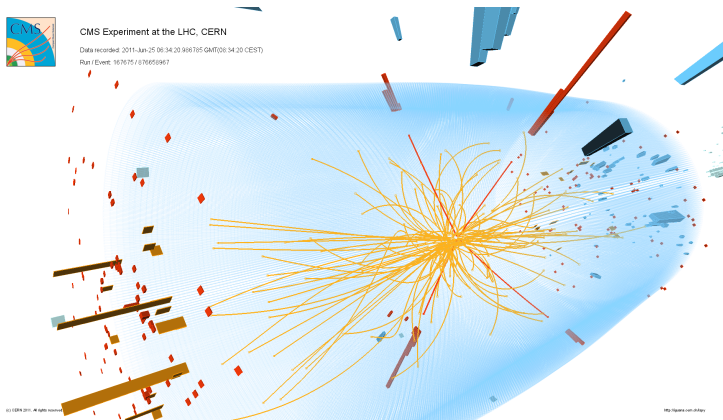
- Higgs-Mechanismus 1964 von Peter Higgs postuliert
 - beschreibt wie die Masse auf Ebene der Elementarteilchen zustande kommt
 - Masse kommt durch eine ungerichtete Kraft zustande, die das Higgs-Feld auf die Teilchen auswirkt
- Higgs-Boson ist das Quantum zum Higgs-Feld
 - z.B. ist das Photon (γ) das Quantum zum elektromagnetischen Feld
 - d.h. ein Lichtstrahl kann nicht beliebig schwach sein, sondern besteht aus einer bestimmten Zahl γ 's
- Higgs zerfällt sehr schnell (Halbwertszeit ca. 10^{-22} s)
 - z.B. zerfällt es in zwei Z, die dann jeweils in ein Elektron und ein Positron zerfallen können



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-Jan-25 06:34:20 949785 GMT(06:34:20 CEST)

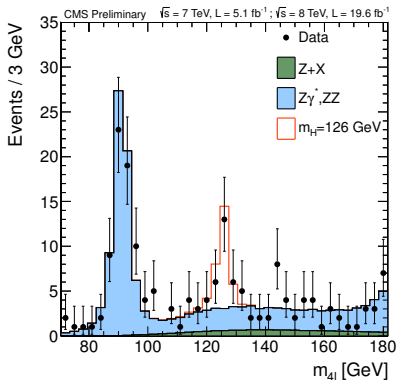
Run / Event: 167675 / 676658967



© CERN 2011. All rights reserved.

ETH Institute for Particle Physics

- Mit Energie-/Impulserhaltung können wir “zurückrechnen”
 - gibt uns eine Masse des Higgs-Kandidaten
 - diese können wir nun mit unserem Modell (Simulationen) vergleichen

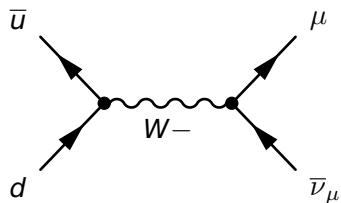
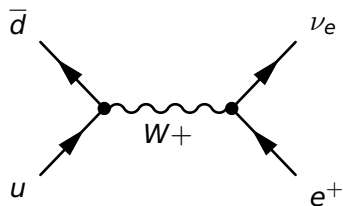


- Physiker interessiert nur das Higgs-Teilchen
- Das Higgs-Teilchen heisst offiziell auch Gottesteilchen
- Der Higgs-Mechanismus erzeugt unser gesamtes Gewicht
- Das Higgs-Teilchen hat etwas mit der Gravitation zu tun
- “Ohne” das Higgs-Feld gäbe es keine Atome

- Physiker interessiert nur das Higgs-Teilchen
→ **Nein**, sondern vor allem das Higgs-Feld und der -Mechanismus
- Das Higgs-Teilchen heisst offiziell auch Gottesteilchen
→ **Nein**, das benutzen nur die Medien
- Der Higgs-Mechanismus erzeugt unser gesamtes Gewicht
→ **Nein**, nur (einige) Elementarteilchenmassen; der grösste Teil der Masse kommt von Bindungsenergien
- Das Higgs-Teilchen hat etwas mit der Gravitation zu tun
→ **Nein**, Gravitation beeinflusst alle Masse nicht nur Elementarteilchenmassen
- “Ohne” das Higgs-Feld gäbe es keine Atome
→ **Ja**, denn die Elektronen wären masselos und würden sich mit c bewegen und nicht um Kerne kreisen

Wichtig für heute: W und Z

- Heute Nachmittag schauen wir W- und Z-Bosonen an
 - das sind schwere Teilchen, d.h. sie zerfallen
 - im Detektor werden wir also nur Zerfallsprodukte sehen
- Genauer konzentrieren wir uns auf $W \rightarrow l\nu$ und $Z \rightarrow ll$
 - was gibt es hier alles für Varianten?
- Damit können wir einige interessante SM-Tests machen
 - z.B. können wir die Masse vom Z bestimmen
 - z.B. ob das W öfter in ein Elektron (+ Neutrino) oder ein Muon (+ Neutrino) zerfällt
 - mehr dazu im Verlauf des Tages



Fragen